

УДК 004.94

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ НА ОСНОВІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ

<sup>1</sup> В. Л. Аносов[valeryanosov68@gmail.com](mailto:valeryanosov68@gmail.com),

ORCID: 0000-0001-7362-4322

<sup>1</sup> Л. М. Богданова, канд. техн наук[libog3096@gmail.com](mailto:libog3096@gmail.com),

ORCID: 0000-0002-5025-9358

<sup>2</sup> В. М. Колодяжний, доктор физ.-  
мат. наук[vladmax1949@ukr.net](mailto:vladmax1949@ukr.net)

ORCID: 0000-0003-0696-1403

<sup>1</sup> В. Д. Літовка[darkness481@gmail.com](mailto:darkness481@gmail.com),

ORCID: 0000-0002-4412-0122

<sup>1</sup> Донбаська державна  
машинобудівна академія,  
84313, Україна, м. Краматорськ,  
вул. Академічна, 72<sup>2</sup> Харківський національний  
автомобільно-дорожній  
університет,61002, Україна, м. Харків,  
вул. Ярослава Мудрого, 25

Наведений проект системи підтримки прийняття рішень для пошуку оптимальної конструкції фрези. На стадії попереднього проектування використовується морфологічний аналіз. Він дозволяє знайти і систематизувати усі можливі структури фрези з необхідним функціональним призначенням. Для автоматизації процесу формування конструкції застосовується алгоритм, що ґрунтується на методі резолюції, який використовує логіку предикатів першого порядку. Робиться перебір можливих станів і складання конструкції фрези з готових елементів. Цей алгоритм доцільно описувати в термінах логічних операцій. Він полягає в дедуктивному виведенні пропозиції вигляду: «Існують розмірні параметри  $x_1, \dots, x_n$  і сили, такі, що конструктивне рішення, яке задовольняє задані властивості  $\Pi(x_1, \dots, x_n)$  виводиться з набору можливих зв'язків  $\forall x_1 \dots \forall x_n (K_1(x_1, \dots, x_n) \wedge \dots \wedge K_n(x_1, \dots, x_n) \Rightarrow V(x_1, \dots, x_n))$ , які означають розмірні, силові та інші реальні зв'язки, що виникають між деталями реальних конструкцій». Переходом від конкретних деталей до логіки предикатів першого порядку є положення, що деяка деталь (наприклад пластина П) може функціонувати в реальних умовах тоді і тільки тоді, коли існує сукупність сил,  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , що її фіксують, які прикладені в точках  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Основними параметрами ефективності конструкції фрези прийняті: надійність, продуктивність, енергоефективність, задані як цільові функції. Вони враховують також статичні та динамічні характеристики конструкції. Змінними показниками є геометрична форма і розмірні параметри фрези. Для кожного варіанта геометричної форми проводиться побудова 3D-моделі фрези і розрахунок її статичних і динамічних характеристик. Далі ці параметри включаються в цільові функції. Оптимізація здійснюється на основі методу градієнтного спуску. Вибір оптимальної конструкції здійснюється за взаємодії інтелектуальних агентів. Водночас конструкція фрези забезпечує найкраще співвідношення цільових функцій. Архітектура системи побудована на інтеграції CAD/CAE-систем з мультиагентною системою (МАС). Пошук рішення здійснюється автоматично в результаті взаємодії самостійних цілеспрямованих програмних модулів – агентів. У цій роботі для побудови МАС використовується бібліотека Jade мови Java в середовищі розробки NetBeans. Розглянутий підхід дозволяє зменшити витрати часу під час проектування або вибору конструкції металорізального інструменту.

**Ключові слова:** структурна оптимізація, мультиагентна система, фреза, бізнес-процес, об'єктно-орієнтований підхід, продуктивність, надійність, енергоефективність.

### Вступ

У конкурентному середовищі досягти потрібної економічної ефективності виробництва можна лише за рахунок впровадження всебічної автоматизації проектування, у тому числі і засобів виробництва, до яких належить металорізальний інструмент [1].

На виробництві часто постає завдання не тільки створення моделі конструкції, але й вибору оптимального її варіанта з декількох можливих альтернатив з урахуванням певних обмежень, властивостей та технічних характеристик.

### Аналіз літературних джерел

Традиційні програмні системи здатні діяти здебільшого за закладеними в них чіткими послідовностями. Є декілька підходів до створення програмних комплексів, побудованих на інтеграції CAD/CAE-систем з мультиагентною системою (МАС). Головна перевага МАС – це гнучкість. Вони здатні орієнтува-

тися в складній обстановці, мати справу з нечітко поставленими задачами, адаптуватися до умов, що змінюються. У МАС кожній сутності ставиться у відповідність програмний агент, який відповідає її інтересам [2, 3].

В основі мультиагентного підходу лежить поняття мобільного програмного агента, який реалізований і функціонує як самостійна спеціалізована комп'ютерна програма або елемент штучного інтелекту. На відміну від класичного способу, коли проводиться пошук деякого чітко детермінованого алгоритму, в мультиагентних технологіях рішення виходить автоматично в результаті взаємодії декількох самостійних цілеспрямованих програмних модулів – агентів [4].

Чим складніше виріб, тим значніше позначаються помилки за неузгодженого прийняття рішень різними фахівцями. Як зазначається в [5], МАС добре працюють для запобігання подібним ситуаціям.

У задачах пошуку оптимального розв'язку кількість ітерацій залежить від обраного методу оптимізації та від розмірності простору пошуку. Найбільш ефективні підходи, що дозволяють скоротити час обчислень, – генетичні алгоритми і розподілені обчислення на основі інтелектуальних агентів [6, 7].

Для розв'язання складних погано формалізованих задач використовуються інтелектуальні програми. Це призводить до значного зростання їхньої ресурсоемності і складності. Одним з успішних підходів є розробка розподілених інтелектуальних систем на базі МАС [8].

Одна з найбільших в світі компаній корпоративного таксі Addison Lee (Лондон) використовує систему, яка дозволяє розподіляти і планувати приблизно 13 тисяч замовлень в день за наявності декількох тисяч власних машин (з них до 800 постійно на лінії), оснащених засобами GPS-навігації.

Інтелектуальні агенти використовуються також в системах керування роботами.

Для створення умов комплексної безпеки автомобіля на дорозі служить інформаційно-діагностична підсистема «Автоматизована допомога на дорозі» (АПД) для on-line обслуговування водіїв з використанням сучасних датчиків і контролерів, а також контролю всієї системи на базі мультиагентного підходу.

Багато МАС мають комп'ютерні реалізації, що ґрунтуються на покроковому імітаційному моделюванні: компанія VTextact Technologies (Великобританія) використовує агентну платформу ZEUS; Comtec (Японія) – Comtec Agent Platform; Comtec Agent Platform – JADE; Fujitsu Labs (США) – AAP; Nortel Networks (Великобританія) – FIPA-OS.

На стадії попереднього проектування доцільно застосувати морфологічний метод, у якому виділяють аналіз і синтез [9]. Метод є одним з широко вживаних комбінаторних методів оцінки існуючих і пошуку нових рішень [10; 11]. Він дозволяє знайти і систематизувати усі можливі структури об'єкта з необхідним функціональним призначенням. Узагальнена структура класу наводиться у вигляді морфологічних таблиць, що часто називаються морфологічним ящиком. Вони можуть бути як бінарними, так і багатовимірними [9; 12].

Це простий об'єкт з добре відпрацьованими правилами заповнення і пошуку рішень. Морфологічний метод добре піддається формалізації, що дозволяє використовувати його під час автоматизованого проектування [13].

Морфологічний аналіз і синтез активно використовується Ю. М. Кузнецовим для проектування затискних механізмів верстатів [14]. Об'єкт розчленовується за функціональними або технологічними ознаками, створюється комбінаторний файл з урахуванням усіх можливих конструктивних і технологічних реалізацій об'єкта, а також обмежень.

Під час проектування різального інструменту морфологічний метод застосований у С. Г. Нагорняка [15] для торцевих фрез з пружно-демпфувальними елементами й у В. А. Настасенка [16] - для стружкових канавок черв'ячних модульних фрез.

Завдання вибору оптимальної детермінованої структури полягає в пошуку структури, яка найкращим чином (в сенсі обраного критерію) виконувала б деяку задану сукупність функцій  $Z$  за заданих

умов функціонування [17]  $Z = \max_{S \in S(F)} L(S) = \max_{S \in S(F)} \sum_i \left( \sum_j l_{ij} - C_i \right)$ , де  $S(F)$  – множина всіх структур, що

відповідають множині  $F'$ ;  $l_{ij}$  – ефективність на  $i$ -й елемент виконання об'єктом  $i$  операції  $j$ ;  $C_i$  – витрати.

Далі задача структурної оптимізації, що полягає у визначенні вигляду функціонала  $F$ , розв'язується за одним з відомих методів.

**Мета і задачі дослідження**

Мета дослідження – розробка додатку для підтримки прийняття рішень, що визначає оптимальну конструкцію різального інструменту – фрези на основі поєднання розрахунку статичних характеристик конструкції з подальшою оптимізацією її продуктивності, надійності та енергоефективності.

**Методи і матеріали досліджень**

У нагальній роботі досліджується конкретний технічний виріб – збірна торцева фреза.

Для зображення проектованого бізнес-процесу доцільно використати SADT-діаграми. Для адекватного опису системи їх потрібно декілька. Діаграми, зібрані і пов'язані разом, стають SADT-моделлю. Діаграма верхнього рівня описує систему в загальних термінах "чорного ящика" (SADT-діаграма 0-го рівня), а діаграми нижнього рівня – дуже деталізовані аспекти та операції системи (деталізовані SADT-діаграми 1-го, 2-го і т. д. рівня).

В ході аналізу проблематики предметної області було виділено основний бізнес-процес ( $A_0$ ) «Структурна оптимізація конструкції фрези», на основі якого було побудовано SADT-діаграму 0-го рівня (див. таблицю).

*Опис контекстної структурно-функціональної моделі для структурної оптимізації конструкції фрези*

Вхідні дані	Керування	Виконавець	Вихідні дані
перелік властивостей; перелік критеріїв; перелік конструктивних рішень; 3D-модель; цільові функції	нормативні документи; інструкції; обмеження математичної моделі; фізичні та технічні обмеження фрези;	програмно-методичний комплекс (ПМК); дослідник; інтелектуальні агенти	варіант оптимальної конструкції

Для побудови деталізованих SADT-діаграм активності розкриваємо більш детально, тому виконаємо декомпозицію бізнес-процесу. Відокремимо такі етапи:

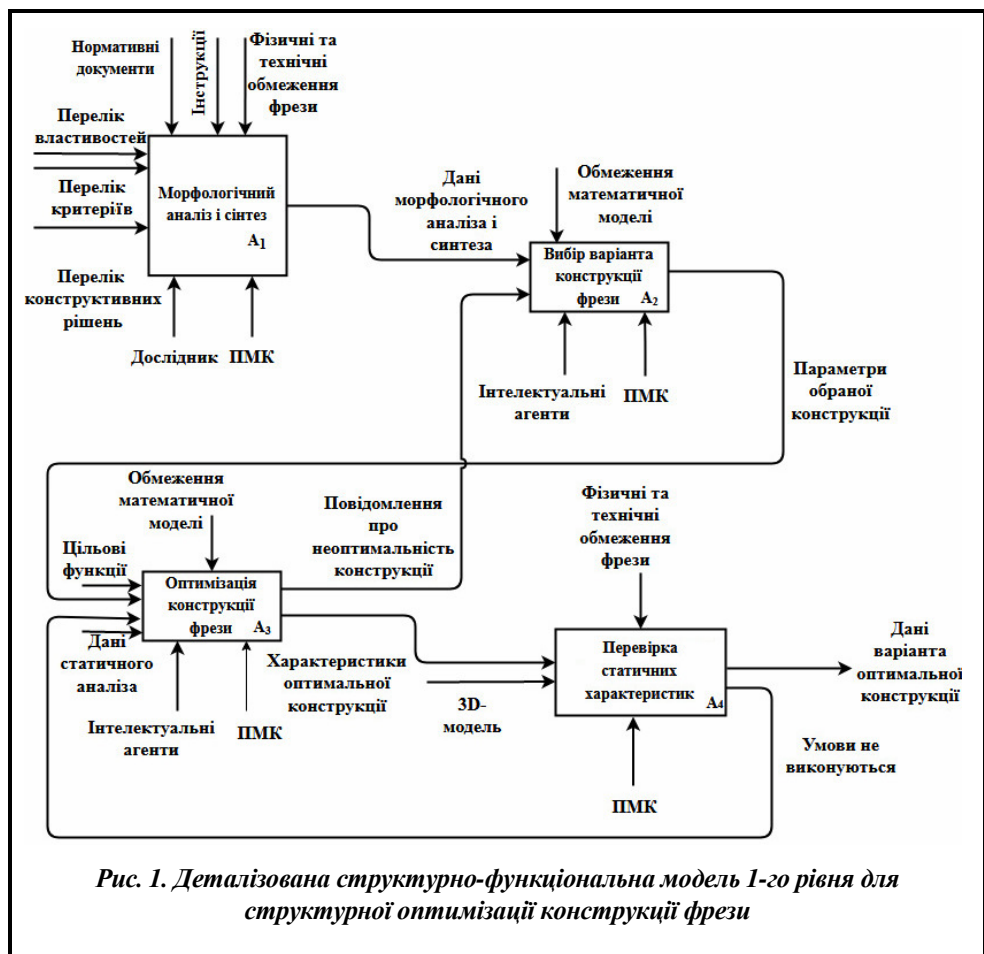
$A_1$ . Морфологічний аналіз і синтез, на якому виконується побудова морфологічних таблиць і класифікація існуючих конструкцій фрез, а також формування структури нової конструкції;

$A_2$ . Вибір варіанта конструкції фрези;

$A_3$ . Оптимізація конструкції фрези за робочими параметрами;

$A_4$ . Перевірка статичних та динамічних характеристик.

Деталізована SADT-діаграма 1-го рівня відображена на рис. 1.



*Рис. 1. Деталізована структурно-функціональна модель 1-го рівня для структурної оптимізації конструкції фрези*

На виробництві зазвичай використовується декілька критеріїв для оцінювання доцільності експлуатації конструкції інструменту. Найбільш вживаними є:

- продуктивність;
- надійність;
- енергоефективність;
- витрати.

Пошук конструкції різального інструменту, яка буде забезпечувати найкраще значення потрібного критерію, є пріоритетним завданням роботи.

Змінними показниками можуть виступати геометрична форма та розміри фрези і різальних елементів – пластин. Для кожного варіанта геометричної форми фрези виконується побудова 3D-моделі та розрахунок статичних характеристик вузла кріплення пластини. Параметрична оптимізація елементів конструкції фрези здійснюється за допомогою роботи системи декількох інтелектуальних агентів. Агенти відповідають за розрахунок оптимальних значень цільових функцій: продуктивність, надійність, енергоефективність, витрати. Це дозволяє обрати форму і розміри різальних пластин.

Зазвичай оптимізація за продуктивністю, надійністю й енергоефективністю проводиться на максимум, за витратами – на мінімум. У всіх випадках змінною буде глибина різання. Існує залежність основного розміру різальної пластини ( довжини) від глибини різання. Далі розрахункове значення довжини пластини наводиться до найближчого більшого зі стандартного ряду.

Продуктивність роботи фрези характеризується швидкістю видалення матеріалу за формулою

$$Q = t \cdot ae \cdot \frac{V_f}{1000}, \text{ см}^3/\text{хв},$$

де  $t$  – глибина різання, мм;  $ae$  – ширина фрезування, мм;  $V_f$  – подача столу, мм/хв.

Надійність роботи фрези характеризується періодом стійкості

$$T = \left( K_v \frac{C_v \cdot D^{qv}}{V \cdot t^{xv} \cdot fz^{yv} \cdot ae^{uv} \cdot z^{pv}} \right)^{\frac{1}{mv}}, \text{ хв},$$

де  $C_v$  – коефіцієнт розмірностей умов обробки;  $D$  – діаметр фрези, мм;  $K_v$  – поправковий коефіцієнт;  $V$  – швидкість різання, м/хв;  $fz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $z$  – кількість зубів, шт;  $qv, xv, yv, uv, pv, mv$  – коефіцієнти розмірностей параметрів моделі.

Оцінка енергоефективності роботи фрези виражається потужністю, яку можна визначити за формулою

$$P_C = \frac{t \cdot ae \cdot V_f \cdot kc}{60 \cdot 1000000 \cdot \eta}, \text{ кВт},$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії, %;  $kc$  – фактична питома сила різання, Н/мм<sup>2</sup>.

Витрати на обробку 1 м<sup>2</sup> поверхні наближено можна поррахувати як суму таких частин:

$$A = A_1 + A_2 + A_3, \text{ гр. од.},$$

де  $A_1$  – витрати на експлуатацію станка;  $A_2$  – витрати на твердий сплав;  $A_3$  – витрати на інструмент.

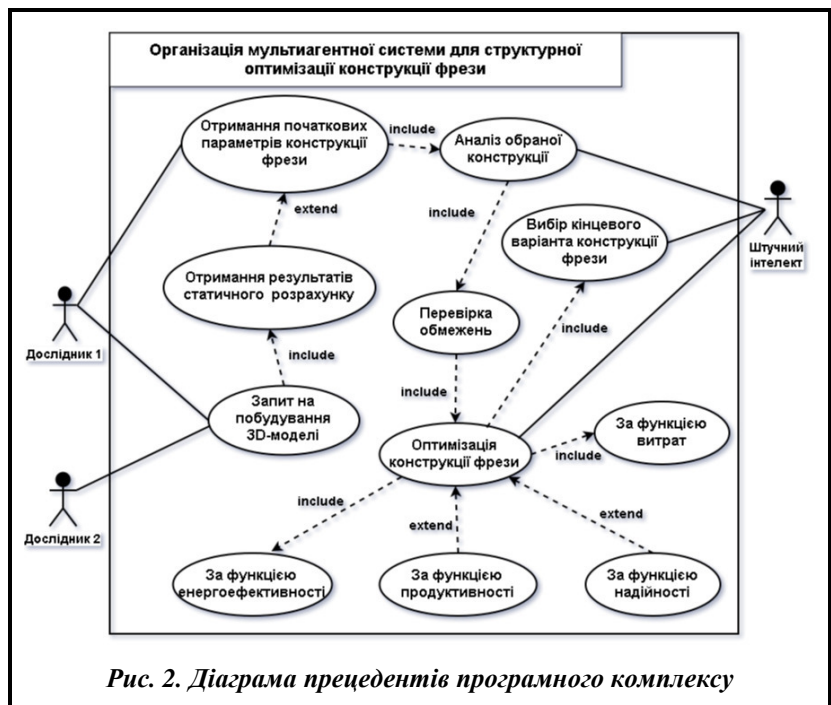


Рис. 2. Діаграма прецедентів програмного комплексу

## Результати роботи

Функції розробленої програми для структурної оптимізації конструкції фрези подано на рис. 2.

Головне вікно програмного комплексу для структурної оптимізації конструкції фрези наведено на рис. 3. Для побудови мультиагентної системи використовується бібліотека Jade в середовищі розробки Netbeans мови Java.

Кнопка «Побудова 3D-моделі та САЕ-розрахунок» на формі програмного комплексу (рис. 3) надає можливість виконати макрос засобами зовнішньої САД-системи і таким чином виконати формування 3D-моделей ножів фрези. Результати САЕ-аналізу візуалізуються за допомогою САД-системи.

Дослідження проведено для умовної поверхні деталі з сірого чавуну розміром  $1 \text{ м}^2$ . Вихідними значеннями є характеристики оброблюваного матеріалу та режими різання під час механічної обробки.

Результати розрахунку і оптимізації за вказаними вище критеріями являють собою обрану форму різальної пластини та її розміри, а також числові значення критеріїв.

Кругла пластина з діаметром пластини 16 мм не відповідає умовам еквівалентних напружень. Межа плинності матеріалу різальної пластини дорівнює 1270 МПа, а максимальні напруження для ножа фрези з діаметром пластинкою 16 мм досягають 2683 МПа. В квадратній пластини з розміром різальної кромки 19 мм напруження досягають лише 1149 МПа, що надає можливість використання саме такого типорозміру пластини.

З використанням морфологічного методу створено конструкцію фрези з розподілом зрізу, що дозволяє збільшити продуктивність механічної обробки. Розподіл зрізу виконується за рахунок використання двох кутів у плані ( $60$  та  $75^\circ$ ) і різного вильоту ножів [18]. Реалізацію конструкції наведено на рис. 4.

## Висновки

Запропонований підхід дозволяє вирішувати більш складні завдання з проектування конструкцій інструменту, мінімізувати помилки у виборі конкретної фрези, що підвищить якість процесу фрезерування.

Виконано проектування і програмну реалізацію прототипу інформаційної системи на основі запропонованого алгоритму. Цим задовольняється потреба у спеціалізованому прикладному програмному забезпеченні під час проектування технічних об'єктів.

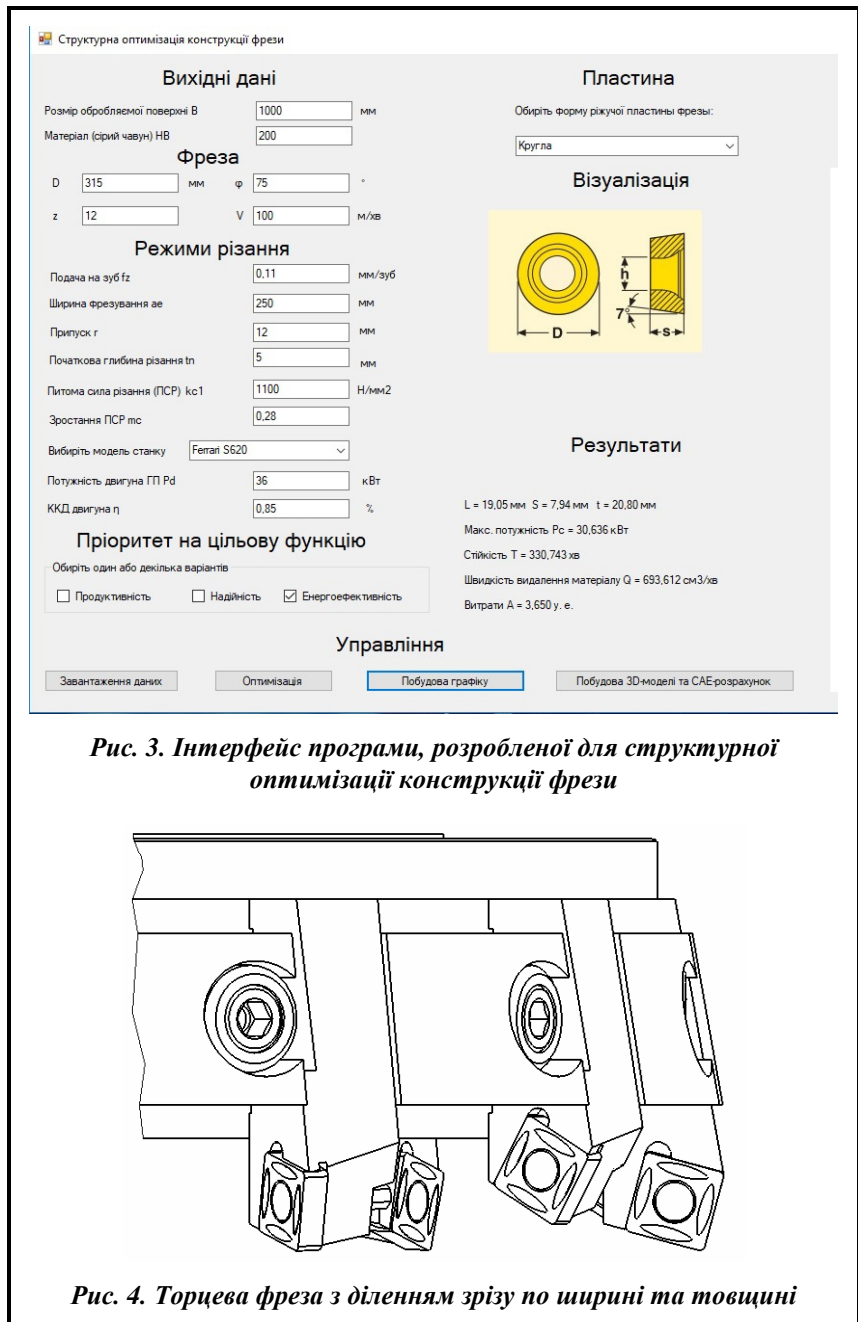


Рис. 3. Інтерфейс програми, розробленої для структурної оптимізації конструкції фрези

Рис. 4. Торцева фреза з діленням зрізу по ширині та товщині

## Література

- 1 Сенькин Е. Н. Подсистема многокритериальной параметрической оптимизации режущего инструмента. *Станки и инструмент*. 1989. № 4. С. 15–17.
- 2 Субботин С. О., Олейник А. О., Олейник О. О. Неитеративные, эволюционные и мультиагентные методы синтеза нечеткологических и нейросетевых моделей (под ред. С.О. Субботина). Запорожье: Запорож. нац. техн. ун-т, 2009. 375 с.
- 3 Gerhard Weiss edited by. *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. London, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1999. 609 p.
- 4 Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: 2-е изд. (пер. с англ.). М. : ООО «И.Д.Вильямс», 2016. 1408 с.
- 5 Лахин О. И. Симонова Е. В., Скобелев П. О. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий. *Информ.-управляющие системы*. 2015. №2. С. 43–47.
- 6 Козырева В. В. Автоматизация вариантного проектирования конструкций на основе систем агентов с адаптивным поведением: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Моск. строит. ун-т. М., 2013. 19 с.
- 7 Литвиненко В. А., Ховансков С. А. Организация распределенных вычислений на основе мультиагентного подхода. *Изв. Таганрог. радиотехн. ун-та*. 2007. С. 246–251.
- 8 Набока М. В. Проектирование систем управления сложными информационными процессами с применением многоагентной технологии: автореф. дис. ... канд. техн. наук /Волгоград. техн. ун-т. Волгоград, 2004. 20 с.
- 9 Одрин В. М. Метод морфологического анализа технических систем. М. : ВНИИПИ, 1989. 312 с.
- 10 Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения). М.: Машиностроение, 1998. 476 с.
- 11 Asunción Álvarez, Tom Ritchey. Applications of General Morphological Analysis from Engineering Design to Policy Analysis. *Acta Morphologica Generalis, Swedish Morphological Society*. 2015. Vol. 4. No. 1. P. 1–40. URL: <http://www.amg.swemorph.com/pdf/amg-4-1-2015.pdf>.
- 12 Гузенко В. С. Направленный морфологический анализ и синтез инструмента для особо тяжелых условий резания. *Надежность режущего инструмента*. Краматорск: Краматорск. индустр. ин-т, 1991. Вып.4. С. 83–91.
- 13 Тарасов О. Ф., Алтухов О. В., Сагайда П. І., Васильєва Л. В., Аносов В. Л. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 239 с
- 14 Кузнецов Ю. М., Луців І. В., Дубиняк С. А Теорія технічних систем (під заг. ред.. Ю. М. Кузнецова). К.;Тернопіль: Тернопіль. техн. ун-т, 1997. 310 с.
- 15 Нагорняк С. Г., Зеленський К. В. Синтез сборных торцовых фрез с упругодемпфирующими элементами. *Изв. вузов. Машиностроение*. 1991. № 10–12. С. 123–125.
- 16 Настасенко В. А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений. К. : Техніка, 1994. 44 с.
- 17 Хае Г. Л., Гах В. М., Громаков К. Г., Гузенко В. С., Ивченко Т. Г., Локтев А. Д., Музыкант Я. А. Сборный твердосплавный инструмент (под общ ред. Г. Л. Хаега). М. : Машиностроение, 1989. 256 с.
- 18 Фреза торцева зі ступінчастою схемою різання: пат. 32129 Україна, МПК (2006) B23 C5/02 / В. С. Губенко, О. Ф. Бабін, В. Л. Аносов. № u 2007 12614. заявл. 14.11.2007; опубл. 12.05.2008 р. Бюл. № 9. 3 с.

Надійшла до редакції 11.10.2018